開放端を持つ1次元ハバード鎖における電荷ギャップ(基研研究会「統計物理の展望」,研究会報告)

草部, 浩一; 出口, 哲生; Yue, Ruihong

開放端を持つ1次元ハバード鎖における電荷ギャップ

草部浩一 †、出口哲生 ‡, §、 Ruihong Yue¶
† 東京大学物性研究所
‡Institute for Theoretical Physics, State University of New York, Stony Brook, USA
§ お茶の水女子大学人間文化研究科
¶Institute of Modern Physics, Northwest University, Xian, China

1次元ハバード模型は典型的な強相関可解電子模型として古くから知られているが [1]、比較的最近、開いた境界条件での厳密解が見い出されたことで、新たな注目を集めている [2, 3, 4, 5]。というのは、境界サイトに化学ポテンシャルのシフト（境界電場）か局所ゼーマン磁場を掛けた場合でも可解性が保証されているため、1) 電子状態の境界場による変化を厳密解析することができ [6, 7]、2) モット絶縁体近傍にあるメゾスコピック・デバイス等での低次元強相関効果を考察する出発点の一つにもなり得る、と考えられるからである。ここでは、モット絶縁体近傍での境界場による電荷ギャップの消失という現象を厳密解析した例を紹介し [7]、強相関低次元電子系における伝導現象を解析する展望を考察したい。

一方の境界サイトに $-p$ という化学ポテンシャルがかかっている1次元ハバード鎖を考えよう。U が有限であれば、基底状態はモット絶縁体であり、電荷励起にはギャップが開いている。さて、電荷ギャップの消失とは、次のようなことである。p を U よりも大きくすると、境界サイト上にいた電子は鎖の内部に入った方がエネルギー利得がある。ところが、内部に侵入した電子は動き回れるので、一粒子電荷励起はギャップを持たなくなる、と予想される。この現象を厳密解を用いて精密に理解しよう。

1次元ハバード模型の固有状態は Bethe ansatz を用いて記述され、固有値問題は Bethe ansatz 方程式と呼ばれる連立方程式の根を求める問題に還元される。今の場合には、

$$\frac{(e^{-ik_j}p+1)}{(e^{ik_j}p+1)}e^{i2k_jL} = \prod_{m=1}^{M}\frac{(\sin k_j - v_m + iU/4)(\sin k_j + v_m + iU/4)}{(\sin k_j - v_m - iU/4)(\sin k_j + v_m - iU/4)}, \quad j=1,\cdots,N \tag{1}$$

$$\prod_{n\neq m}^{M}\frac{(v_m - v_n + iU/2)(v_m + v_n + iU/2)}{(v_m - v_n - iU/2)(v_m + v_n - iU/2)} = \prod_{j=1}^{N}\frac{(v_m - \sin k_j + iU/4)(v_m + \sin k_j + iU/4)}{(v_m - \sin k_j - iU/4)(v_m + \sin k_j - iU/4)}, \quad m=1,\cdots,M \tag{2}$$

（N, M はそれぞれ電子数と down spin の数）となり、k_j, v_m という擬運動量とラピディティと呼ばれる、それぞれ電荷自由度とスピン自由度を表現する自由度が現れる。通常基底状態を表す k_j, v_m は実根であるが、実は境界場により複素根が現れうるのである。複素根は、1電子問題で言えば境界に束縛された状態を表すが、多電子問題である今の場合にも類似の複素擬運動量が現れる。興味深いのは、この複素根、詳しくは2つの複素 k_j と1つの複素 v_m が現れた時点で、実根を与える量子数（I_j）として許される整数が一つ増えるという事実である。この “埋まっていない I_j” という意味のホールの出現が、基底状態の上に連続電荷励起を作り出すのである。図1に、1次元ハバード鎖のスペクトルの例を示す。p の増加とともに、電荷励起の分枝が基底状態に接近してくる様子が分かる。十分に長い鎖では、$p = p_{c3} = U/2 + \sqrt{1+U^2/4}$ となった時点で、電荷ギャップ Δ_c が消失するのである。（転移点の解析的評価法など詳細は文献 [7] を参照。）

今考察したことは、理想的な1次元モット絶縁体鎖に電場を掛けたり、化学ポテンシャルが異る物質を接合した場合に何が起こるかを理論的に可能な限り厳密に考察するための一つの出発点になるかもしれない。実際そのような構造は表面上の人工構造などを用いて作られつつある。[8]

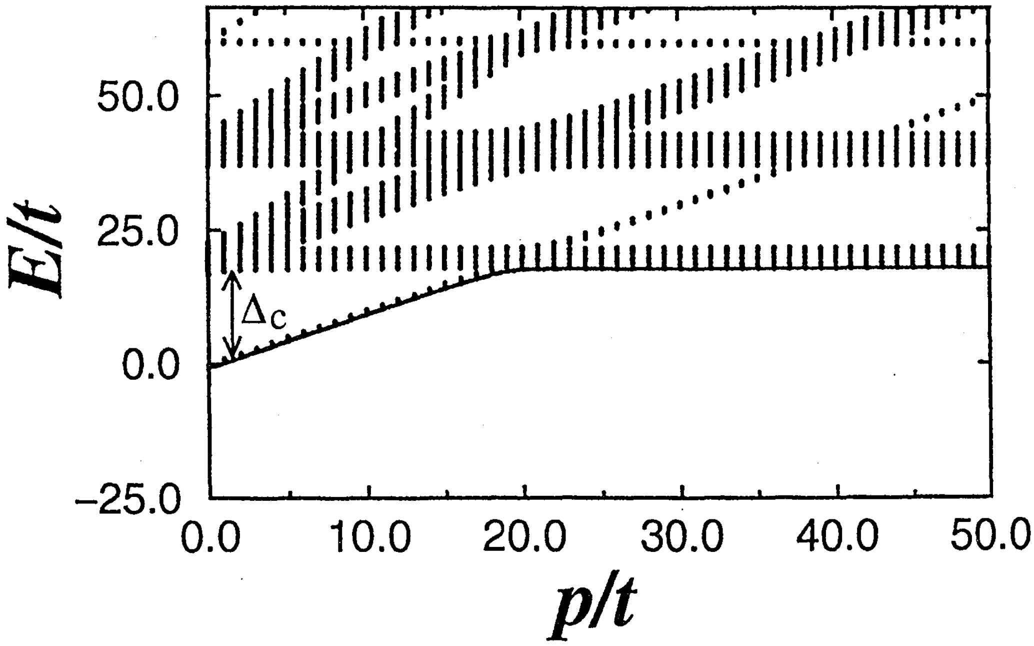

図1. 1次元6サイトハバード鎖のスペクトル。p、Δ_c はそれぞれ、境界化学ポテンシャルとハバードギャップ。ハバード U は、$U = 20t$ とした。

参考文献

[1] E.H. Lieb and F.Y. Wu, Phys. Rev. Lett. **20** (1968) 1445.

[2] H. Schulz, J. Phys. **C18** (1985) 581.

[3] H. Asakawa and M. Suzuki, J. Phys. **A29** (1996) 225.

[4] T. Deguchi and R.H. Yue, *preprint* (1996) OCHA-PP-84, Cond-mat/9704138.

[5] M. Shiroishi and M. Wadati J. Phys. Soc. Japan **66** (1997) 1.

[6] R.H. Yue and T. Deguchi, J. Phys. **A30** (1997) 8129.

[7] T. Deguchi, R.H. Yue and K. Kusakabe, to appear in J. Phys. A: Math. Gen.

[8] Hashizume *et al.* Jap. J. Appl. Phys. **35** (1996) L1085.